解 説

AIを用いた魚による 浄水場水質監視支援システム

柏 木 雅 彦 *・中 沢 昭 夫 *・依 田 幹 雄 **・馬 場 研 二 ***

1. は じ め に

浄水場において水の安全生を確認することはもっとも重要な使命といえる。微量の異常成分を化学的に分析するには高精度の分析計器が開発されており、各種の水質が適時分析されている。これら水質分析を補完し水の安全性を総合的に判定するために、水棲生物を用いた水質監視が行われている。例えば、コイ、フナ、タナゴなどの淡水魚を用い、水質異常時における異常行動や生死を目視で観察している。急性毒性物質が混入した場合には、魚が水面近くまで浮遊してくる「鼻上げ行動」や、狂ったように泳ぎ回る「狂奔行動」などが表れ¹⁾、これらの現象が観察されたら水質異常の可能性があるため、取水を停止すると共に厳密な化学分析を行う。魚による監視は、不特定多数の急性毒性物質が、万が一、原水などに間違って混入した場合にも対応できるという大きな長所がある。

これら魚による水質監視は単純な方法ではあるが、その有効性が経験的に知られており、諸外国でも広く実施されている。しかし、この方法は魚の行動を観察するという、あいまいで定量化しにくい面をもち、また、魚の行動に影響する因子も考慮して判断しなければならず、オペレータの経験に負うところが大きい。

著者らは、このような人間の知的作業を支援する手段としてAI (Artificial Intelligence: 人工知能) の適用を進めている^{2~6)}。AIとは広義には人間の判断を記号論理的に取扱う知識工学(狭義のAI)を初め、画像認識や言語理解などを含む学問領域を指す。著者らは、魚による水質監視を、魚類行動を定量的に観察する手段としてまず画像認識技術を適用し、さらにオペレータの判断機能を知識工学で代替するシステムを

開発した。

以下に、AIを活用した魚による水質監視支援システムについて解説する。

2. 従 来 の 研 究

水質異常を検知するための各種の自動監視法が研究されている。検知方式を大別すると、呼吸系や循環器系の活動状態など魚類の生理的特性を化学的または電気的に検出する方式^{7~10)}と、行動パターンの異常を電気的に検出する方式^{11,12)}となる。前者の方式は検出感度は比較的高いが、オンライン監視に不向きなものが多く、魚類の専門家を必要とするなど、現在なされている監視を大幅に変更することになる。後者の方式は、水槽に光電管を設置し、その光路を魚類が横切る頻度をカウントするもので、前者を比較すれば検出感度はやや劣るもののノイズや外乱の影響が小さいとされている。しかし、魚類の動きを大まかに検出する方式であるため、信頼性の点では改善の余地がある。

3. AI監視支援システム

著者らは、現状の監視作業を効果的に支援する方法として、連続自動監視が可能で、複数の魚に対しても適用可能な方法を提案している。

3. 1 システム構成

システム構成を図-1に示す⁵⁾。本システムは、画像処理システムと知識処理システムとからなり、各々は、オペレータの視覚機能と判断機能とに相当する。まず、水槽で飼育する1尾または複数尾の魚をリアルタイムで認識しなければならない。原水の濁りにかかわらずこれを行うために、水槽の後方から光散乱板を通して照明する方式を採用した²⁾。この照明方式は魚類を影絵のように撮像するもので、魚類を常に暗い物体として撮像できるので、魚類を容易に認識できる。また、直接照明法に比べて低い照度で撮像できるため、

* ㈱日立製作所機電事業本部
Masahiko KASHIWAGI, Akio NAKAZAWA
** " 大みか工場 Mikio YODA
*** " 日立研究所 Kenji BABA

図-1 水質のAI監視支援システム

魚にストレスを与えにくいメリットもある。

画像処理システムで解析した魚類の行動パターン（位置分布や速度分布など）から正常／異常を判定するが、行動パターンの異常が急性毒性物質によるものか否かを次に判定する。この方法として知識処理システムを適用した。ここでは、溶存酸素濃度や水温のような水質因子の影響、異常の程度や急性毒性物質の濃度に関する知識、並びに、オペレータの独自のノウハウがあらかじめ格納されており、これに基づいて異常判断を支援する。

3.2 画像処理フロー

画像処理フローの概略を図-2に示す²⁾。所定時間（1秒以内）に1回、魚類を画像認識し、魚の水深方向の位置分布を計算する。一方、重心座標の時系列か

図-2 画像解析手順

ら速度を計算し、速度の頻度分布を計算する。フナを1尾用いた場合の位置分布と速度分布の例を図-3に示す。計測時間は9分である。図-3左列の位置分布から、正常時に水槽底部に位置した魚が異常時には水面近くに浮遊してくることが明らかであり、このことから、鼻上げ行動を検知可能である。また、図-3右列の速度についても速く遊泳する頻度が増加することから狂奔行動を検知できる。

魚が複数尾の場合⁶⁾には、図-4に示すようにして2値画像から魚群の位置分布を計算することができる。まず、図-4(a)に示す魚群の2値画像を水平方向に投影し（図-4(b)）、水深方向の魚群画像の分布を記憶する。一定のインターバルごとに得られた(b)の分布を積算し、さらに基準化して水深方向の位置分布（ $F_{w,i}(t)$ ；図-4(c)）を計算する。この位置分布に基づいて、鼻上げ行動を定量化するために「鼻上げ行動指標」を用いる。図-4(c)の斜線部で示すように、鼻上げ行動指標（ R_w で記す）は、魚群が水深 Y_c より上に位置した頻度を表し、次式で定義される。

$$R_w(Y_c, t) = \sum_{Y_i = Y_1}^{Y_c} F_{w,i}(t) \quad (1)$$

図-3 正常時/異常時の行動パターンの相違

図-4 魚群の鼻上げ行動指標 R_w の算出法

ここで、 $F_w, i(t)$ は水深 Y_i に魚群が位置した相対頻度、 Y_e は水面近くの座標を表し、 $R_w(Y_e, t)$ は Y_e より浅いところに位置した魚の割合を表す。鼻上げ行動指標 $R_w(Y_e, t)$ は、その値が大きい程、水面近くに魚群が高い頻度で位置したことを表す。

3.3 実験結果例

正常時のコイの例を図-5に示す。このように R_w 値は0ではなく、魚群が時々水面近くに浮上していることを表す。このことは経験的な観察と一致する。しかし、 R_w 値の大きさは高々0.15であってこれ以上の値は観察されない。ところが、水質異常時には、図-6に示すように R_w 値が急激に増減し、これによって異常を知ることができる。一旦増加後、減少するのは魚群が鼻上げ行動を呈して水面近くに浮上した後、死んで水底に沈んだことを示す。また、図-6に示すように、シアン濃度によって R_w 値の増減のパターンが異なるが、これは呼吸代謝の障害の程度がシアン濃度によって大きく異なるためである。この現象を利用すれば、 R_w 値の経時変化を計測することにより異常の度合いを識別可能なことを示唆する。例えば、 R_w 値が0.15を超えている時間を T_c とすると、この時間の長短は異常の度合いを表す。速度については、複数の魚の個体識別は困難であるので、相対的な魚群の活動量を推定するために画像の時間微分値（差分処理）に

図-5 正常時における R_w 値の経時変化（コイ）

図-6 CN^- 注入前後の R_w 値の変化

着目する方法が有効である。

このように、魚類の行動を画像処理する方法は、数種の魚について鼻上げ行動指標により急性毒性物質を極低濃度まで検知できることが実証されている。例えば、清水に棲むニジマスなどの反応は極めて敏感（シアン=0.01~0.05mg/l）であり、逆にコイやフナなどは反応が比較的緩慢（シアン=0.1mg/l）である。タナゴやウグイはこの中間程度である。しかし、魚種の選択は原水の水質に依存するので、各浄水場によって違ってくることに留意する必要がある。

3.4 魚類の行動解析

鼻上げ行動指標による異常判定に当たっては、この指標の統計的な分布特性が利用される。図-7は、図-5の R_w 値の頻度分布（ $F_r(R_w)$ で記し、 R_w の頻度を表す）を整理した結果で、特に、縦軸 F_e を(2)式で示すように、 $F_r(R_w)$ の対数値で表した。

$$F_e = \log e(F_r(R_w)) \quad (2)$$

図-7から、 R_w と F_e とは(3)式で示すように、直線で近似できる。ここで、 a は負の係数である。

$$F_e = a \cdot R_w \quad (3)$$

(2)式と(3)式とから(4)式を得る。

$$F_r(R_w) = \exp(a \cdot R_w) \quad (4)$$

a は負の係数であるので、鼻上げ行動指標の頻度は、 R_w 値が大きいほど指数関数的に減少する。すなわち、指数分布として表現できる。このことは、魚が水面近くに長時間位置することは極めてまれであることを意味するが、魚が鳥などの外敵から身を守る行動（水面にあまり表れない）と関係があると思われる興味深い。

一方、異常時には図-7に斜線（図-6：シアン=0.1mg/l）で示すように、この分布から明らかにはずれる値となり、このことから正常時の分布ではないことを知ることができる。以上のように、目視観察を画像処理で代替することは、視覚データの客観的な評価を可能とし、また、現象の解明にも有用であるとい

図-7 R_w 値の頻度分布

える。

3. 5 知識工学の適用

3. 4 節で説明したように、魚類行動を画像解析することによりその正常／異常を判定可能なことを示したが、魚類の行動パターンは、急性毒性物質以外の水質の影響も受けるため、さらに信頼度高く判定するにはオペレータの判断メカニズムを模倣することが有効である。たとえば、オペレータは、酸欠時には魚が水面近くに浮上し、また水温が低い時は動きが鈍くなることを経験的知識としてもっている。著者らの実験結果では、ウグイの場合、酸欠に起因する鼻上げ行動は溶存酸素濃度 $\leq 0.5\text{mg}/\ell$ で起こり、温度については 10°C 以下では反応の遅れが出てくる⁴⁾。このような水質の影響を図-8に示すように知識ベースとして記憶しておけば、水質診断をよりの確に行うことができる。このような知識 (production rule) は、「if……then……」という形式で記述される⁵⁾。

次に、異常時における魚の反応の程度は急性毒性物質の濃度によって異なるが、これは、行動パターンの種々の組合せ (位置分布と速度分布との組合せ、あるいはそれらの時間的な変化パターン) で判定することができる。図-8は、位置と速度の組合せによって正常から異常 (緊急) まで4分類した例を示してある。このような方法によれば、きめ細かに水質を診断し、対策を状況に応じて効果的に行うことができる。また、事前に考慮しなかった因子がある場合にはこれらのルールを追加することもできる。例えば、魚の大きさや栄養条件によって反応の程度は異なってくるので、これらを加味することも可能である。このようにして、異常の程度や異常物質の概略濃度を知識処理によりガイ

図-8 水質の知的診断

ダンスすることは、オペレータにとって使い勝手の面で大きなメリットになる。

4. お わ り に

本稿では、魚を用いた浄水場水質監視にAIを活用した例を紹介したが、この他にフロック監視や下水処理場における活性汚泥微生物の画像監視システムなども開発されている。これらのシステムは、画像や知識という、人間にとってよりフレンドリーなメディアを用いる点で、次世代の監視システムに不可欠な要素システムとして位置付けられよう。反面、人間の知的機能 (視覚機能や判断機能) を支援することは、人間の関与する部分を少なくするような印象を与えやすい。しかし、主体である人間に、客観的かつ連続的な判断材料を提供して初めて、人間がより高度の知的判断と的確な対策とを行い得るものといえる。

参 考 文 献

- 1) 日本水道協会：水道維持管理指針，pp35 (1982)
- 2) 馬場研二，矢萩捷夫：水質異常検知を目的とする魚類行動の画像監視—画像認識法の検討—，水質汚濁研究，Vol. 11, No. 2, pp114—122 (1988).
- 3) 馬場研二，矢萩捷夫，飯田高士，大木伸夫：魚類行動パターン解析に基づく水質異常判定法，水質汚濁研究，Vol. 11, No. 8, pp38—44 (1988).
- 4) 馬場研二，矢萩捷夫：魚類行動パターンに及ぼす魚種及び環境条件の影響，水質汚濁研究 (投稿中)
- 5) S. Nogita, K. Baba, H. Yahagi, S. Watanabe, S. Mori: Acute Toxicant Warning System Based on a Fish Movement Analysis by use of AI Concept: Int. Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications, IEEE (1988/5).
- 6) 馬場研二，矢萩捷夫：魚群行動の画像解析による水質異常監視支援技術の研究，水道協会雑誌 (投稿中)
- 7) Morgan, W. S. A.: Fish Locomotive Behavior Patterns as a Monitoring Tool, Jour. WPCF., 51, 3, pp580—589 (1979).
- 8) 松尾雄三：フナのえら蓋の活動電位による急性毒性の監視実験，水道協会雑誌，第54巻，第10号 (第613号)，pp17—25. (昭60. 10)
- 9) 菅野明男，近藤純一郎，磯村康博，天羽孝志：水中生物の呼吸量測定による有害物質の迅速監視(I)，水道協会雑誌，No509号，pp13—25 (1977).
- 10) 池口隆，野北舜介：指標生物による有害物質流入の早期検知法，第30回全国水道研究発表会，pp422—424 (1977).
- 11) Waller, W. T., and Cairns, J. Jr.: The Use of Fish Movement Patterns to Monitor Zinc in Water, Wat. Res., Vol. 6, pp257—269 (1972).
- 12) 中村文雄：魚類の行動変化に基づく水質の常時監視方法に関する基礎的研究(I)，水道協会雑誌，第54巻，第1号 (第604号)，pp17—26 (昭60. 1)